УДК 519.23 https://doi.org/10.23947/2541-9129-2020-1-43-47

Математический анализ и прогнозирование динамики загрязнения атмосферы Российской Федерации стационарными источниками

Е. С. Горбачева, И. М. Пешхоев

Донской государственный технический университет (г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Введение. В статье рассмотрена динамика загрязнений воздуха стационарными источниками в Российской Федерации за период 1998–2016 гг. Вредные выбросы в атмосферу оказывают большой вред всем живым организмам. Вследствие этого существенно сокращается продолжительность жизни населения. Поэтому оценка количества загрязнений и последующие меры для охраны атмосферного воздуха являются приоритетными целями нашего времени.
Постановка задачи. Задачами исследования являются: анализ динамики загрязнений, построение математической модели данного процесса и реализация прогноза на пятилетний срок.
Теоретическая часть. Данные для работы взяты из официального статистического сборника. Для расчетов использованы компьютерные технологии Microsoft Excel и StatSoft Statistica.
Выводы (заключение). На основании проведенного анализа была построена адекватная математическая модель, которая может представлять интерес для прогнозирования техногенных воздействий на окружающую среду.

Ключевые слова: загрязнение атмосферы, математическая модель, метод наименьших квадратов, прогнозирование.

Для цитирования: Горбачева, Е. С. Математический анализ и прогнозирование динамики загрязнения атмосферы Российской Федерации стационарными источниками / Е С. Горбачева, И. М. Пешхоев // Безопасность техногенных и природных систем. — 2020. — № 1 — С. 43−47.

Mathematical analysis and forecasting of the dynamics of air pollution by stationary sources in the Russian Federation

E. S. Gorbacheva, I. M. Peshkhoev

Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Introduction. The article considers the dynamics of air pollution by stationary sources in the Russian Federation from 1998 to 2016. Harmful emissions into the atmosphere cause great harm to all living organisms. As a result, the life expectancy of the population is significantly reduced. Therefore, the assessment of pollution volumes and subsequent measures for the protection of atmospheric air are priority tasks of our time.
Problem statement. The objectives of the study are to analyze the dynamics of pollution, build a mathematical model of this process, and implement a forecast for a five-year period.
Theoretical part. Data for the work is taken from the official statistical book. Microsoft Excel and StatSoft Statistica computer technologies are used for calculations.
Conclusion. Based on the analysis, an adequate mathematical model is constructed, which may be of interest for predicting the anthropogenic impact on the environment.

Keywords: atmospheric pollution, mathematical model, least squares method, forecasting.

For citation: Gorbacheva E.S., Peshkhoev I.M. Mathematical analysis and forecasting of the dynamics of air pollution by stationary sources in the Russian Federation: Safety of Technogenic and Natural Systems. 2020;1: 43−47.

Введение. Загрязнение атмосферы несет большой вред не только живым организмам, но и гидросфере, почвенно-растительному покрову, зданиям, сооружениям и другим объектам. У людей, проживающих в местах с загрязненным воздухом часто возникают такие заболевания как аллергия, онкология, различные болезни легких. Вследствие этого существенно сокращается продолжительность жизни. Поэтому охрана атмосферного воздуха является одной из приоритетных задач нашего времени.

Основными источниками загрязнений атмосферы в России являются: промышленность, транспорт, коммунальное и сельское хозяйства. Уровень загрязнения воздуха зависит, как правило, от степени урбанизации и промышленного развития территории.

В работе рассматривается масса вредных веществ (далее — загрязнение), выброшенных стационарными источниками в атмосферу за 1998–2016 гг. Задача авторов — проанализировать динамику изменения загрязнения, построить математическую модель этого процесса и спрогнозировать его на пятилетний срок. Исходные данные взяты из сборника «Россия в цифрах» [1].

Методология. Значения загрязнения атмосферного воздуха представлены в табл. 1, а их графическое отображение — на рис. 1.

Таблица 1

Значения загрязнения атмосферы в РФ

Год	Загрязнение, млн т	Год	Загрязнение, млн т
1998	18,7	2008	20,1
1999	18,5	2009	19
2000	18,8	2010	19,1
2001	19,1	2011	19,2
2002	19,5	2012	19,6
2003	19,8	2013	18,4
2004	20,5	2014	17,5
2005	20,4	2015	17,3
2006	20,6	2016	17,3
2007	20,6	-	-

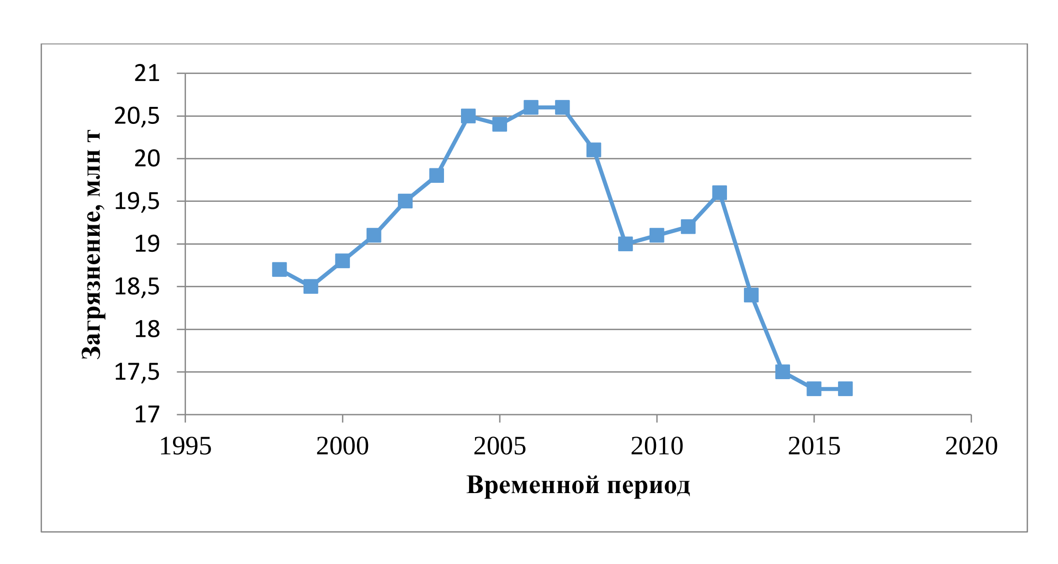


Рис. 1. Динамика изменения загрязнения атмосферы в РФ

Исходные данные демонстрируют колебания загрязнения на фоне некоторого тренда к снижению, поэтому модельная зависимость загрязнения от времени является линейной комбинацией монотонно убывающей и колебательной функций. Монотонно убывающая функция представляет собой экспоненту, а колебательная — синусоиду [2–4]:

$$\bar{X} = A + Be^{-C(t-1998)} + D \cdot sin\left[\frac{2\pi}{E}(t+F)\right], \quad (1)$$

где $\bar{X}$ — математическое ожидание величины загрязнения; t — год; A, B, C, D, E, F — параметры экспоненциально-гармонической функции.

Так как подгоночных параметров в функции (1) много: три параметра в экспоненте (константа, амплитудный и временной) и три параметра в синусоиде (амплитудный, частотный и сдвиговый), а исходных данных мало, то процесс идентификации модели был разделен на два этапа.

На первом этапе, пренебрегая колебаниями, была выделена экспоненциальная зависимость:

$$\bar{Y} = A + Be^{-C(t-1998)}.$$

Коэффициенты A, B и C находятся путем решения оптимизационной задачи:

$$\sum_i (Y_i - Y(t_i))^2 \rightarrow min, \quad (2)$$

где t_i — значение аргумента (времени); Y_i — фактическое значение загрязнения:

$$Y(t_i) = A + Be^{-C(t_i-1998)}.$$

На втором этапе рассмотрена колебательная часть:

$$\bar{Z} = D \cdot sin\left[\frac{2\pi}{E}(t+F)\right].$$

Коэффициенты D, E и F находятся путем решения оптимизационной задачи:

$$\sum_i (Z(t_i) - (Y_i - Y(t_i)))^2 \rightarrow min, \quad (3)$$

где t_i — значение аргумента (времени):

$$Z(t_i) = D \cdot sin\left[\frac{2\pi}{E}(t_i+F)\right];$$

Y_i — фактическое значение загрязнения:

$$Y(t_i) = A + Be^{-C(t_i-1998)}.$$

Результаты. Для нахождения неизвестных коэффициентов использованы функции пакета «поиск решения» *Microsoft Excel* [5–7]. В результате решения оптимизационной задачи (2) методом наименьших квадратов [8] были найдены коэффициенты: A = 15,4; B = 4,378; C = 0,017. В результате решения оптимизационной задачи (3) были найдены коэффициенты: D = 1,253; E = 19,287; F = –2001,84.
Окончательный вид зависимости (1):

$$\bar{X} = 15{,}4 + 4{,}378 \cdot e^{-0{,}017(t-1998)} + 1{,}253 \cdot sin\left[\frac{2\pi}{19{,}287}(t-2001{,}84)\right]. \quad (4)$$

Характеристики, полученные по модели (4), приведены в таблице 2 [9].

Таблица 2

Характеристики модели

Год	Фактическое загрязнение, млн т	Расчетное загрязнение, млн т	Абсолютное отклонение, млн т	Относительное отклонение, %	Квадрат относительного отклонения, %
1998	18,7	18,587	0,113	0,603	0,363
1999	18,5	18,700	0,200	1,083	1,173
2000	18,8	18,920	0,120	0,639	0,408
2001	19,1	19,216	0,116	0,605	0,366
2002	19,5	19,548	0,048	0,247	0,061
2003	19,8	19,875	0,075	0,379	0,144
2004	20,5	20,155	0,345	1,684	2,836
2005	20,4	20,350	0,050	0,243	0,059
2006	20,6	20,434	0,166	0,805	0,648
2007	20,6	20,390	0,210	1,017	1,035
2008	20,1	20,217	0,117	0,581	0,337
2009	19	19,925	0,925	4,866	23,678
2010	19,1	19,538	0,438	2,293	5,258
2011	19,2	19,091	0,109	0,567	0,322
2012	19,6	18,624	0,976	4,977	24,774
2013	18,4	18,181	0,219	1,191	1,419
2014	17,5	17,801	0,301	1,718	2,951
2015	17,3	17,518	0,218	1,259	1,585
2016	17,3	17,356	0,056	0,323	0,105

Рассчитаны следующие показатели:
- коэффициент корреляции — 0,936;
- среднее значение абсолютного отклонения — 0,253 млн т;
- среднее значение относительного отклонения — 1,320 %;
- максимальное относительное отклонение — 4,977 %;
- среднеквадратическое отклонение — 1,885 %;
- адекватность модели — 1,889 %.

Значения загрязнения атмосферы, полученные по модели (4), показаны на рис. 2.

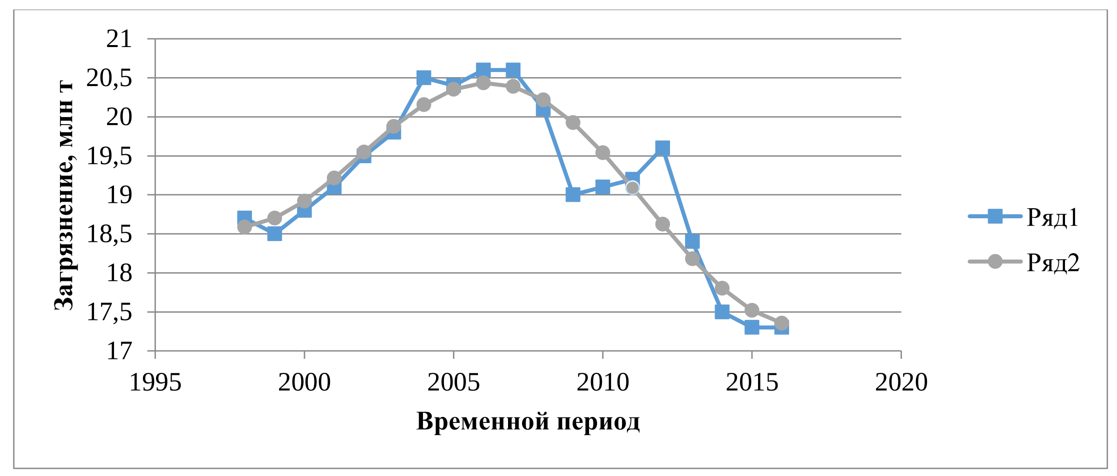


Рис. 2. Динамика изменения загрязнения атмосферы в РФ:
ряд 1 — фактические данные; ряд 2 — расчетные данные

Также по формуле (4) был получен прогноз на период 2017–2021 гг. [10]. Результаты прогнозирования представлены в таблице 3.

Таблица 3

Сравнение реальных и прогнозируемых данных по загрязнению

Год	Реальное значение, млн т	Спрогнозированное значение, млн т
2017	17,5	17,326
2018	17,1	17,426
2019	-	17,639
2020	-	17,937
2021	-	18,284

Погрешность прогноза на 2017 г. — 0,994 %, на 2018 г. — 1,906 %.

Заключение

- проанализирована динамика загрязнения воздуха стационарными источниками в Российской Федерации за 1998–2016 гг.;
- найдена зависимость, которая отражает изменение количества вредных выбросов за указанный интервал времени;
- построена адекватная математическая модель, которая может представлять интерес для прогнозирования техногенных воздействий на окружающую среду и применяться в качестве одного из инструментов при разработке альтернативных моделей такого прогнозирования;
- реализован прогноз динамики изменения загрязнения атмосферы в РФ на пятилетний срок.

Библиографический список

1. Россия в цифрах. Краткий статистический сборник / под ред. П. В. Малкова. — Москва : Росстат, 2019. — 549 с.
2. Гмурман, В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика : учебник для вузов / В. Е. Гмурман. — Москва : Юрайт, 2018. — 479 с.
3. Минашкин, В. Г. Статистика : учебник для вузов / В. Г. Минашкин. — Москва : Юрайт, 2018. — 448 с.
4. Мхитарян, В. С. Статистика : учебник и практикум для вузов / В. С. Мхитарян. — Москва : Юрайт, 2018. — 464 с.
5. Практикум по статистике в *Excel* : учебное пособие для вузов / Б. В. Соболь, И. М. Пешхоев, Л. В. Борисова, Т. А. Иваночкина [и др.]. — Ростов-на-Дону : Феникс, 2010. — 381 с.
6. Вадзинский, Р. Н. Статистические вычисления в среде *Excel* / Р. Н. Вадзинский. — Санкт-Петербург : Питер, 2008. — 608 с.

7. Яковлев, В. Б. Статистика. Расчеты в *microsoft excel* : учебное пособие для вузов / В. Б. Яковлев. — Москва : Юрайт, 2018. — 353 с.

8. Зенков, А. В. Численные методы : учебное пособие для вузов / А. В. Зенков. — Екатеринбург : изд-во Уральского университета, 2016. — 124 с.

9. Тюрин, Ю. Н. Анализ данных на компьютере / Ю. Н. Тюрин, А. А. Макаров. — Москва : МЦНМО, 2016. — 367 с.

10. Садовникова, Н. А. Анализ временных рядов и прогнозирование. Вып 2 : учебное пособие для вузов / Н. А. Садовникова, Р. А. Шмойлова ; Московский государственный университет экономики, статистики и информатики. — Москва, 2004. — 199 с.

Сдана в редакцию 14.12.2019
Запланирована в номер 10.01.2020

Об авторах:

Горбачева Елена Сергеевна, магистрант Донского государственного технического университета (344000, г.Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7459-2980, lukashewa.alena@yandex.ru

Пешхоев Иса Мусаевич, доцент кафедры «Информационные технологии» Донского государственного технического университета (344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат физико-математических наук, доцент, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0352-9586, peshkhoev@rambler.ru

Заявленный вклад соавторов:

Е. С. Горбачева — постановка задачи, сбор и анализ литературных данных, определение методологии исследования, вывод математической зависимости, идентификация модели и расчет ее коэффициентов, проверка адекватности математической модели, получение прогноза и проверка погрешности данных, редактирование текста, литературный анализ, оформление статьи; И. М. Пешхоев — научное руководство, формулирование основной концепции исследования и структуры статьи.

Submitted 14.12.2019
Scheduled in the issue 10.01.2020

Information about the authors

Elena S. Gorbacheva, Master's degree student, Don State Technical University (344000, Russian Federation, Rostov-on-Don, Gagarin square, 1), ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7459-2980, lukashewa.alena@yandex.ru

Isa M. Peshkhoev, Associate professor, Department of Information Technologies, Don State Technical University (344000, Russian Federation, Rostov-on-Don, Gagarin square, 1), Candidate of physical and mathematical sciences, Associate professor, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0352-9586, peshkhoev@rambler.ru

Contribution of the authors

E. S. Gorbacheva — statement of the problem, collection and analysis of literature, research methodology, derivation of the mathematical dependence, identification model and calculation of its coefficients, checking the adequacy of mathematical models, receiving a forecast and verification of data errors, text editing, literary analysis, preparation of the manuscript; I. M. Peshkhoev — scientific supervision, formulation of the basic concept of the study and structure of the article.